

O uso de compostos zeolíticos como adsorventes para a remoção de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Mn): uma revisão

The use of zeolitic compounds as adsorbents for the removal of heavy metals (Pb, Cu, Cr and Mn): a review

El uso de compuestos zeolíticos como adsorbentes para la remoción de metales pesados (Pb, Cu, Cr y Mn): una remoción

Recebido: 18/11/2022 | Revisado: 28/11/2022 | Aceitado: 29/11/2022 | Publicado: 06/12/2022

Mauricio Castro da Costa Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-5047>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: mauricio.filho@itec.ufpa.br

Alcino Matos de Azevedo Pontes Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1931-6956>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: alcino08@gmail.com

Marlice Cruz Martelli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8512-2706>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: martelli@ufpa.br

Resumo

O descarte industrial de metais pesados, em especial, chumbo, cobre, cromo e manganês, promove a contaminação ambiental e afeta diretamente a saúde humana. Com a finalidade de minimizar o impacto gerado por esses contaminantes, a adsorção tem sido uma prática empregada em virtude de sua simplicidade e de seu baixo custo/benefício. Assim, materiais naturais como os compostos zeolíticos possuem grande eficiência na remoção desses metais. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é o de expor os resultados de uma revisão sistemática de literatura sobre o uso de zeólita como adsorvente no processo de remoção de íons de chumbo, cromo, manganês e cobre em solução aquosas. A pesquisa foi realizada em periódicos de bases de dados nacionais e internacionais, nos últimos seis anos, com eficiência de adsorção dos metais contaminantes superior a 70%. Na pesquisa realizada pôde-se constatar a elevada eficiência de remoção dos cátions por meio das zeólitas, grande parte, em razão de sua geomorfologia e aos tratamentos físico-químicos realizados.

Palavras-chave: Contaminante; Zeólita; Metais pesados; Resíduo; Argilominerais.

Abstract

Industrial disposal of heavy metals, especially lead, copper, chromium and manganese, promotes environmental contamination and directly affects human health. In order to minimize the impact generated by these contaminants, adsorption has been a practice used due to its simplicity and low cost/benefit ratio. Thus, natural materials such as zeolite compounds are highly efficient in removing these metals. The objective of this work is to expose the results of a systematic literature review on the use of zeolite as an adsorbent in the process of removing lead, chromium, manganese and copper ions from industrial effluents. The research was carried out in journals of national and international databases, in the last six years, with adsorption efficiency of contaminating metals greater than 70%. In the research carried out, it was possible to verify the high efficiency of removal of cations by means of zeolites, largely due to their geomorphology and the physicochemical treatments performed.

Keywords: Contaminant; Zeolite; Heavy metals; Residue; Clay minerals.

Resumen

La disposición industrial de metales pesados, especialmente plomo, cobre, cromo y manganeso, promueve la contaminación ambiental y afecta directamente la salud humana. Con el fin de minimizar el impacto generado por estos contaminantes, la adsorción ha sido una práctica utilizada debido a su sencillez y baja relación costo/beneficio. Por lo tanto, los materiales naturales como los compuestos de zeólita son muy eficaces para eliminar estos metales. Así, el objetivo de este trabajo es exponer los resultados de una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de la zeólita como adsorbente en el proceso de remoción de iones de plomo, cromo, manganeso y cobre de efluentes industriales. La investigación se realizó en revistas de bases de datos nacionales e internacionales, en los últimos seis años, con eficiencia

de adsorção de metais contaminantes, superior al 70%. En la investigación realizada se pudo comprobar la alta eficiencia de remoción de cationes por medio de zeolitas, en gran parte debido a su geomorfología y a los tratamientos físico-químicos realizados.

Palabras clave: Contaminante; Zeolita; Metales pesados; Residuo; Minerales de arcilla.

1. Introdução

A poluição química advinda do despejo industrial é uma problemática recorrente na indústria brasileira. Entre as demais cargas orgânicas e inorgânicas despejadas ao final do processo produtivo, salienta-se os metais pesados, no geral, tóxicos e de grande impacto ao meio ambiente e à saúde humana (Pergher et al., 2005). Esse despejo de contaminantes se intensificou com o aumento da produção industrial e o desenvolvimento de diferentes métodos de transformação de variados recursos (Piquet & Martelli, 2022).

Nesse contexto, de acordo com Zeferino e Freitas (2013) a metodologia mais comum no tratamento de efluentes industriais é o método biológico, porém, no caso dos metais pesados, esse método em questão não pode ser utilizado devido à natureza inorgânica desses compostos. Assim, é necessário o tratamento químico prévio do efluente estudado para a remoção dos metais, geralmente, por meio da precipitação química ou extração por solvente.

No entanto, esses processos supracitados não atingem grande grau de eficiência quando aplicados a baixas concentrações dos metais, dessa forma, uma prática que tem ganhado grande evidência nas pesquisas acadêmicas é a utilização de adsorventes para reter esses íons metálicos. Dentre os adsorventes estudados, a zeólita se destaca como uma alternativa rentável e simples, proporcionando a seletividade dos íons e sua retenção (Rigo et al., 2009).

Diante disso, o grande potencial desenvolvido pela zeólita como adsorvente de metais pesados exige um exame de sua eficiência. Nesse sentido, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar os resultados de uma revisão sistemática de literatura, sobre o estudo da efetividade do uso da zeólita como adsorvente no processo de remoção dos cátions de chumbo, cromo, manganês e cobre em solução aquosa para uma possível aplicação no tratamento de efluentes industriais.

2. Metodologia

Essa pesquisa trata-se de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL). De acordo com Brizola e Fantin (2016), esse tipo de revisão consiste na análise das publicações e compêndio das informações pertinentes, buscando aprofundar o conhecimento teórico sobre o assunto investigado e contribuir para o desenvolvimento da comunidade acadêmica.

A metodologia utilizada para a composição e seguimento do trabalho foi preconizada por Galvão e Ricarte (2020) e Lima et al. (2022), seguindo essas etapas para o levantamento bibliográfico: 1) delimitação da questão norteadora da pesquisa, 2) seleção das bases de dados e elaboração da estratégia de busca, 3) apresentação e interpretação dos resultados.

2.1 Delimitação da questão norteadora

A pesquisa foi construída avaliando uma possível estratégia para a redução dos impactos ambientais relacionados ao descarte de metais pesados, em especial cobre, cromo, chumbo e manganês. Dessa forma, para a formulação da temática em questão, ponderou-se a contribuição dos materiais zeolíticos ao meio ambiente no processo de remediação desses metais. Assim, a questão norteadora é: “há viabilidade no uso de compostos zeolíticos como adsorvente para remoção de cátions de chumbo, manganês, cromo e cobre contidos nos efluentes líquidos?”.

2.2 Seleção das bases de dados e busca na literatura

Os bancos de dados do Google Scholar e periódicos CAPES foram os escolhidos para o levantamento dos artigos entre os períodos de 2017 até 2022, utilizando as respectivas palavras-chaves como ferramenta para auxiliar na busca sistemática: zeólitas, adsorção, metais pesados e suas traduções na língua inglesa e espanhola, totalizando 9601 trabalhos.

Através da leitura dos títulos e resumos destes trabalhos, foi dada a prioridade aos trabalhos que apresentaram eficiência de adsorção igual ou superior a 70% e que utilizam o mecanismo de adsorção atômica. Além disso, trabalhos de conclusão de curso, teses, dissertações, artigos de revisão e modelagem não foram levados em consideração, totalizando 9101 artigos descartados.

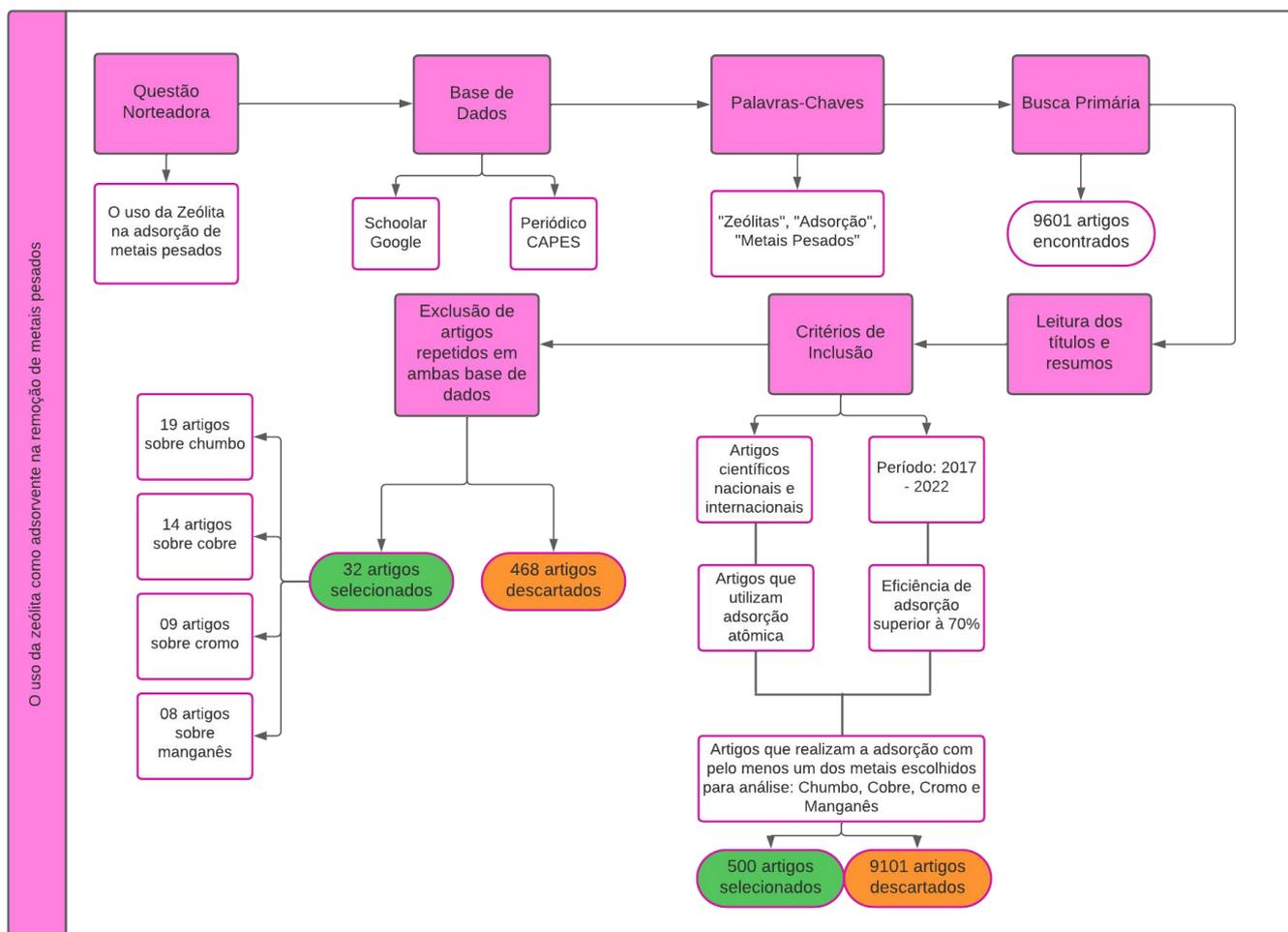
Posteriormente, sobre os 500 artigos restantes efetuou-se a exclusão das duplicatas em ambas as bases selecionadas e a análise do conteúdo dos resultados desses artigos pertinentes à pesquisa sistemática descrita aqui. Ao final, o levantamento realizado apontou 32 artigos selecionados, aos quais 19 possuem referência à adsorção de íons de chumbo, 14 de íons de cobre, 09 de íons de cromo e 08 de íons de manganês.

2.3 Apresentação e interpretação dos resultados

Os artigos selecionados foram analisados através dos seus resultados obtidos e apresentados em uma Tabela, constituídas por: autor/ano de publicação, título, objetivo e resultado/conclusão. Posteriormente, realizou-se uma discussão detalhada estes resultados, possibilitando caracterizar a viabilidade do uso de zeólitas, através do equilíbrio e da cinética de adsorção dos metais estudados e sugerir propostas para futuras pesquisas.

A Figura 1 mostra o fluxograma das etapas de pesquisa utilizadas neste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma das etapas de pesquisa da RSL.



Fonte: Autores (2022).

3. Metais Pesados

Apesar de não haver consenso sobre a definição deste termo, podemos descrever metais pesados como um grupo de elementos químicos com alta densidade e toxicidade, mesmo em baixas doses. Segundo Lima e Merçon (2011), os metais pesados têm como valor de referência uma densidade maior ou igual à 3,5 e 7,0 g/cm³, uma massa atômica acima de 23 (massa atômica do sódio) e um número atômico maior do que 20 (número atômico do cálcio).

Esses compostos podem ser introduzidos de diferentes formas na natureza, porém, destacam-se entre as atividades antrópicas que mais descartam esses compostos, as atividades agrícolas e industriais (Souza et al., 2018). Ademais, seu descarte no ambiente pode impactar a saúde dos seres vivos, afetando diretamente os órgãos relacionados ao sistema nervoso e ao sistema circulatório, ingeridos na maioria das vezes devido ao acúmulo desses compostos entre os níveis tróficos da cadeia alimentar.

Na Tabela 1 é possível encontrar uma lista de metais de acordo com a sua massa específica.

Tabela 1 - Metais classificados em função de sua massa específica.

Metais	Massa específica
Li, Be, Al, Na, Mg, K, Ca, Se, Rb, Sr, Cs, Fr	$\leq 3,5 \text{ g/cm}^3$
Ti, V, Y, Zr, Ge, Ga, Sb, Ba, Ra, La, Ce, Pr, Eu, Yb	$\geq 3,5 \text{ g/cm}^3$
Nb, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, In, Sn, Bi, Po, Nd, Pm, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu	$\geq 7,0 \text{ g/cm}^3$
Hf, Ta, W, Mo, Te, Ru, Rh, Pd, Ag, Au, Hg, Tl, Pb, Ac, Th, Pa, U	$\geq 10,0 \text{ g/cm}^3$
Re, Os, Ir, Pt	$\geq 20,0 \text{ g/cm}^3$

Fonte: Lima e Merçon (2011).

3.1 Cromo

O cromo é um mineral bastante comum no organismo humano, está presente nos mais diversos alimentos como carnes, cereais e leguminosas, além disso, é utilizado na fabricação de suplementos esportivos, ajudando no processo de ganho de massa e perda de gordura corporal, e se apresenta como principal resíduo proveniente da indústria de curtume de couro e da indústria de tintas e derivados (Gomes et al., 2005; Souza et al., 2021).

Contudo, o excesso do mineral no organismo pode impactar a saúde humana e dos demais seres vivos, pois atua no aumento da captação de glicose e aminoácidos, na inibição da síntese enzimática do colesterol e também como agente cancerígeno devido à sua elevada carga mutagênica quando em sua forma hexavalente (Chirwa & Wang, 2007 apud Conceição et al., 2007).

3.2 Manganês

Esse elemento é utilizado pela humanidade desde seus primórdios, pois seus compostos foram utilizados desde o antigo Egito como alternativa para adicionar coloração a vidros e roupas, assim como, verificou-se a partir do desenvolvimento da botânica a relevância do manganês no processo fotossintético e no crescimento dos vegetais (Rocha & Afonso, 2012).

Além disso, a partir do século XIX esse mineral ganhou grande ênfase na indústria metalúrgica, permitindo o desenvolvimento das chamadas ligas de alto manganês, como por exemplo na produção de aço juntamente com o Ferro. Isso foi possível, pois o manganês na natureza se liga a outros elementos químicos principalmente na forma de óxidos, carbonatos e hidróxidos. (Sampaio et al., 2008). Assim, Oliveira et al. (2006) destacam a importância do controle do teor de manganês descartado no ambiente, seja para garantir a qualidade do solo em suprir as necessidades das plantas ou para impedir possíveis impactos aos seres humanos devido ao excesso desse composto.

3.3 Cobre

O cobre é um metal bastante conhecido pelo homem e foi muito importante para o desenvolvimento da sociedade moderna. É um constituinte fisiológico dos organismos, pois como se pode verificar na Tabela 2, mesmo que em quantidades reduzidas está espalhado por todo o corpo humano (Sargentelli et al., 1996). Todavia, quando em grandes concentrações o cobre pode ser prejudicial possuindo ação cancerígena e aos vegetais promovendo a pressão de seleção e extinção das espécies que não conseguem efetuar a biorremediação desse composto (Andreazza et al., 2013).

Tabela 2 - Teores mínimos de cobre encontrados em vários fluidos do corpo humano.

Fluido	Concentração (µg/100ml)
Soro	72
Plasma	75
Eritrócitos	71
Fluido Espinhal	6
Saliva	10
Fluidos digestivos	63

Fonte: Sargentelli et al. (1996).

3.4 Chumbo

O chumbo é um dos contaminantes mais comuns no ambiente, pois é amplamente utilizado nas atividades industriais. De acordo com Moreira F. R. e Moreira J. C. (2004), o metal em questão não apresenta nenhuma função fisiológica conhecida nos seres humanos, mas mesmo assim, devido a contaminação ambiental e bioacumulação na cadeia alimentar grande parte dos indivíduos apresentam certa quantidade de chumbo em seu organismo. Dessa maneira, o chumbo se caracteriza como um elemento altamente tóxico, pois, tem a capacidade de afetar o sistema nervoso nas crianças e nos adultos pode causar neuropatia periférica e nefropatia crônica quando em exposição a grandes concentrações (Schifer et al., 2005).

4. Adsorção

Como já supracitado, o processo de industrialização, principalmente a partir do século XVIII, contribuiu para o aumento do descarte de efluentes industriais, incluindo os metais pesados. Esse descarte no ambiente pode prejudicar a fauna e flora do local, exigindo assim um tratamento prévio do resíduo por métodos convencionais como a precipitação química, a troca iônica, reações de oxirredução, entre outras operações unitárias (Paz et al., 2018). No entanto, a adsorção é uma prática que tem destaque no tratamento de efluentes industriais (Bai & Abraham, 2003). Ela consiste basicamente, em uma concentração dos compostos a serem adsorvidos entre duas diferentes fases para permitir a diminuição da energia livre superficial. Dessa forma, o processo é regido pelo grande número de interações superficiais entre o adsorvente e o adsorvato, influenciados pela solubilidade, pH e temperatura da solução, assim como, a estrutura do composto utilizado para adsorver (Penha et al., 2001).

4.1 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção são parâmetros termodinâmicos que permitem o estudo do processo de adsorção, pois representam a partir de modelos matemáticos o equilíbrio de fases durante esse processo (Araujo et al., 2009).

A distribuição dos íons metálicos entre as fases no processo de sorção geralmente é descrita pelos modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich, os quais se utilizam de alguma variável de equilíbrio, tal como pressão ou concentração, para quantificar o material adsorvido (Silva & Simoni, 2018). Entre as variáveis de equilíbrio utilizadas, destaca-se a concentração da solução em contato com o adsorvente quando se atinge o equilíbrio (Novo et al., 2017). Para o modelo de Langmuir, o aumento da concentração da solução prediz a limitação da capacidade de sorção, em razão da formação de uma monocamada (Guerra et al., 2007). No entanto, o modelo de Freundlich é adequado às adsorções não ideais, em superfícies heterogêneas e adsorções em multicamadas (Chen & Wang, 2007).

4.2 Cinética de adsorção

Assim como o estudo termodinâmico da adsorção é imprescindível à compreensão do mecanismo de remoção dos íons, modelos cinéticos são fundamentais para verificar a velocidade com que o adsorvato é adsorvido (Borba et al., 2012; Cardoso et al., 2020). Para a realização da avaliação cinética do processo de sorção do adsorvato, a capacidade de adsorção do adsorvente e estudada em função do tempo de contato necessário para se atingir o equilíbrio (Lucena et al., 2012).

O comportamento característico adsorptivo dos compostos é descrito por três modelos matemáticos: pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula (Zeferino & Freitas, 2013). Levando em consideração apenas os modelos que não elucidam os modelos de transferência de massa, tem-se que para o modelo de pseudo-primeira ordem, há a ocupação de um sítio ativo do adsorvente, o qual avalia o controle da difusão externo dos íons metálicos, enquanto o modelo de pseudo-segunda ordem possui dois sítios ativos ocupados pelo adsorvato (Silva et al., 2018). Dessa maneira, quanto maiores os valores das constantes de equilíbrio para esses processos, mais rapidamente ocorrerá a adsorção (Schmitz et al., 2021).

4.3 Compostos zeolíticos

De acordo com Hildebrando et al. (2012), a definição clássica dos compostos zeolíticos restringe a alumino-silicatos de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, contudo, essa definição vem sendo modificada, pois juntamente a esses compostos, outros materiais que possuam estruturas tridimensionais abertas como o Boro, o Ferro e até mesmo o Fósforo também podem ser incluídos.

Rigo et al. (2009) destacam a alta área superficial dos argilominerais zeolíticos e o tamanho dos seus poros, os quais proporcionam grande capacidade de adsorção e seletividade. A carga estrutural desses compostos é negativa em virtude da substituição dos cátions de silício da sua estrutura cristalina por cátions de alumínio, necessitando do balanço de cargas pelos demais cátions trocados (Fungaro et al., 2012). Esta proporção Si/Al é fundamental para reger sua capacidade de adsorção e troca iônica, assim como sua distribuição do tamanho e o volume específico de seus poros (Braga & Morgon, 2007 apud Plotegher & Ribeiro, 2009).

5. Resultados

Os resultados obtidos na consulta dos trabalhos referente ao tema estão expostos na Tabela 3, sendo organizados a partir de seu autor/ano, título, objetivos e resultados/conclusão, no qual apresentam as discussões sobre o uso do adsorvente estudado.

Tabela 3 – Descrição dos artigos em estudo.

Autor/Ano	Título	Objetivo	Resultados/Conclusão
Alexander et al. (2017)	Adsorção de colunas de multi-metais de Chumbo (II), Cádmio (II) e Manganês (II) por argila bentonítica natural.	Investigar o impacto da concentração inicial do metal e a vazão nas colunas de multi-metais de chumbo, cádmio e manganês na adsorção da bentonita nigeriana, utilizando diferentes modelos de coluna.	Os resultados mostraram a dependência da adsorção dos íons às concentrações iniciais e à taxa de fluxo do efluente, atingindo uma condição ideal com uma vazão de 1,4 mL/min e uma concentração inicial de 50 mg/L com uma preferência iônica de Pb (II) > Cd (II) > Mn (II). Além disso, os modelos dinâmicos de coluna de Thomas e Yoon-Nelson foram os que melhor se ajustaram a adsorção.
Arroyave-Manco et al. (2017)	Zeólitas FAU e LTA da combustão do carvão e subprodutos para a aplicação de remoção de cromo.	Produção em escala laboratorial de zeólitas tipo A e X a partir de resíduos das indústrias locais da Antioquia e analisar sua capacidade como adsorvente na remoção de Cr ³⁺ como alternativa para agregar valor ao material.	No experimento, as zeólitas apresentaram eficiência considerável na remoção dos cátions de cromo, no qual a zeólita LTA mostrou maior desempenho, chegando a uma capacidade de adsorção de 40 mg de cromo por grama de zeólita. Além disso, verificou-se a melhor da isoterma de Langmuir aos dados experimentais, a qual descreve um processo de sorção em monocamada em uma superfície. Apresentou-se como uma sorção química ajustada ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem., no qual a porcentagem de remoção diminuiu com o aumento da concentração inicial do metal devido a saturação superficial do adsorvente.
Barsi, F. V. (2017)	Remoção de cátions metálicos utilizando zeólita HUSY.	Avaliar a remoção de cátions de zinco, cobalto, cobre, chumbo, cádmio, cromo e níquel a partir da adsorção por zeólita HUSY.	Com exceção do níquel e do zinco que possuíram uma demora maior, os demais metais possuíram um tempo mínimo de equilíbrio de 1 hora, sendo utilizado para o estudo um pH de 7,0, atingindo máxima adsorção para a isoterma de 35°C. Ademais, o zinco e o cobre tiveram um destaque na adsorção, chegando a adsorver 4 vezes mais que os demais metais. Os cátions se encontravam em concentrações de 200 e 500mg/L, atingindo relações de 4,5 a 7 mg de cádmio, níquel, chumbo e cromo para cada mg de zeólita, 18 mg de cobalto para cada mg de zeólita, 21 mg de zinco para cada mg de zeólita e, por fim, 25 mg de cobre para cada mg de zeólita.
El-Maksod et al. (2017)	O efeito das condições de preparação sobre a eficiência de remoção de poluentes da água usando zeólita LTA.	Utilização de zeólita LTA produzida a partir de sílica branca saudita, preparadas a partir da emissão de raios de ultrassom, para a remoção de metais pesados.	A preparação da zeólita a partir da irradiação de raios ultrassônicos afetou principalmente a estrutura cristalina do composto, apresentando um aumento no seu diâmetro e consequentemente um aumento na capacidade de adsorção. Assim, apresentou-se uma proporção de Si/Al igual a 1,15 para a amostra irradiada, na qual houve uma ligeira redução em relação a amostra não irradiada. A isoterma que melhor se ajustou aos dados obtidos foi o modelo de Freundlich para a adsorção em multicamada e a de Langmuir para a adsorção em monocamada.
Rahimi & Mahmoudi (2017)	Estudos de otimização de parâmetros eficientes para remoção de chumbo de soluções aquosas por zeólita natural como adsorvente de baixo custo usando resposta metodologia de superfície.	Investigar o processo de adsorção do chumbo de soluções aquosas por meio da zeólita natural clinoptilolita, atuando como um adsorvente de baixo custo e não tóxico. Além disso, estudar a interferência de fatores como a temperatura, o tempo e a concentração das soluções no rendimento de remoção de chumbo.	Pode-se verificar que a concentração inicial das soluções é o principal parâmetro de para a remoção de Pb ²⁺ , seguida da temperatura. Já o tempo de contato, não apresentou interferência relevante a remoção dos cátions. Dessa forma, encontrou-se as condições ideais ao processo de sorção de chumbo a uma concentração inicial de 2750 ppm, uma temperatura de 65°C e um tempo de contato de aproximadamente 83 minutos, atingindo uma taxa de sorção de 99,81% dos cátions Pb ²⁺ . Além disso, o modelo matemático que melhor se ajustou ao procedimento foi a isoterma de Freundlich.

Rudniak & Barsi (2017)	Estudo do processo de adsorção na remoção de cátions metálicos utilizando zeólita HBEA.	Avaliar a capacidade da zeólita HBEA de adsorção em soluções aquosas dos metais: zinco, cobalto, cobre, chumbo, cádmio, cromo e níquel.	Utilizou-se de isotermas de adsorção à 25°C, 35°C e 40°C buscando linearizar os modelos de Langmuir e Freundlich, no qual o modelo de Langmuir foi o que melhor se adequou aos dados obtidos. Sendo que o zinco e o cobre foram adsorvidos em maior quantidade, chegando a 4 vezes mais que os demais metais, atuando para concentrações de 200 e 500 mg/L. As relações encontradas mostram a adsorção de 5 a 7 mg de cádmio, níquel e chumbo para cada grama de zeólita, 18 mg de cobalto para cada grama de zeólita e 21 mg de cobre e zinco para cada grama de zeólita.
Souza et al. (2017)	Efeito do pH na capacidade máxima de remoção de cobre por zeólita natural.	Avaliar o efeito do potencial hidrogeniônico na capacidade máxima de adsorção de cátions de cobre, utilizando material mineral zeolítico coletado no município de Urupema em Santa Catarina.	Dois amostras de zeólitas foram estudadas, uma zeólita basalto e outra importada de Cuba. Ambas as amostras possuíram baixas densidades, mostrando que não há diferença entre suas adsorções. No entanto, o pH influenciou apenas a zeólita cubana, no qual houve um aumento na adsorção na mudança de pH de 3,0 para 4,0 em concentrações de 10ml/L. As capacidades máximas de adsorção foram semelhantes para ambas as amostras, porém, a zeólita basalto mostrou-se mais favorável a remoção de metais a nível industrial e laboratorial, enquanto a zeólita cubana é comercial e possui um custo maior.
Taamneh & Sharadqah (2017)	A remoção de metais pesados de solução aquosa usando zeólita jordaniana.	Investigar o potencial de remoção de cátions de cobre e cádmio por meio da zeólita jordaniana e correlacionar os dados com isotermas e modelo cinético mais ajustado.	Pode-se verificar que a concentração inicial do metal, o tempo de contato e a massa de adsorvente foram parâmetros fundamentais para o processo de adsorção. Assim, a isoterma de Freundlich foi a que melhor se ajustou a adsorção dos cátions, com capacidades de adsorção de 25,9 mg de cádmio por grama de zeólita e 14,3 mg de cobre por grama de zeólita, ademais, o modelo cinético de pseudo-segunda ordem foi o que mais se adequou aos dados obtidos.
Zanin et al. (2017)	Adsorção de metais pesados da indústria gráfica de efluentes utilizando a zeólita clinoptilolita como adsorvente	Estudo sobre a cinética de adsorção e do equilíbrio na remoção de cobre, cromo e ferro por zeólita clinoptilolita como possível tratamento para o efluente da indústria gráfica.	Os ensaios cinéticos realizados demonstraram que para os íons de cobre e cromo o modelo cinético que mais se ajustou foi o de pseudo-primeira ordem, já para o ferro o modelo de pseudo-segunda ordem melhor se ajustou. Além disso, para os cátions de cobre e cromo a isoterma de Langmuir melhor se adequou enquanto que para o ferro foi a isoterma de Freundlich. Dessa forma, o pH se mostrou como parâmetro de grande importância para a capacidade de remoção, no qual o experimento teve melhor performance para a faixa de pH igual a 4,0.
Al-Essa & Khalili (2018)	Adsorção de metais pesados de soluções aquosas em argila caulinita jordaniana não modificada e modificada: lote e técnica de coluna.	Estudo da introdução da argila caulinita jordaniana modificada pelo ácido húmico como um sistema barato e um adsorvente eficiente em comparação a não modificada, analisando os impactos dos parâmetros como o pH e a temperatura do processo, além de estudar a qual isoterma de adsorção o modelo se adequa melhor.	O trabalho apresentou uma nítida melhora na adsorção dos cátions para a argila modificada com ácido húmico, chegando a um aumento de cerca de vinte vezes mais que a argila caulinita natural. Além disso, verificou-se a grande dependência do processo de sorção do pH, no qual com o aumento dessa grandeza resultou no aumento da remoção dos íons de chumbo. Ademais, a taxa de remoção dos íons tende a diminuir com o aumento da concentração inicial das soluções e a aumentar com o aumento da temperatura do processo. Dessa forma, foi possível verificar que o processo foi endotérmico, pois a constante de equilíbrio de Langmuir aumentou com o aumento de temperatura.
De-La-Veja et al. (2018)	Uso da zeólita faujasita para a adsorção de íons em águas residuais municipais.	Avaliar a capacidade de remoção de metais pesados através da adsorção pela zeólita sintética do tipo faujasita, para íons de ferro, chumbo, cobre e zinco provenientes de águas residuais. Posteriormente, verificar a capacidade de adsorção de matéria orgânica, amoníaco e águas duras.	Em razão da estabilidade térmica obtida durante o experimento, foi possível após um tratamento regenerativo a reutilização da zeólita utilizada. Para os cátions, em águas residuais com baixa concentração de matéria orgânica, os íons de chumbo e cobre tiveram maior afinidade. No entanto, quando há a presença considerável de matéria orgânica na água residual, o zinco e o cobre ganham destaque em virtude do tamanho e carga dos cátions, suas estruturas cristalinas, os sítios de intercâmbio catiônico na zeólita e a formação de complexos orgânicos. Obtendo assim, resultados superiores a 70% de adsorção, viabilizando o uso da zeólita X do tipo faujasita para a adsorção de íons de metais pesados.

Fidelis, et al. (2018)	Aplicação de Bentonita no processo de adsorção para remoção de chumbo.	Investigação do uso da argila bentonita como adsorvente de metais pesados para a descontaminação ambiental, em especial o chumbo, devido ao seu baixo custo operacional e alta eficiência.	Após o tratamento térmico das amostras por calcinação, verificou-se a mudança de coloração das amostras, na qual quanto maior a temperatura de calcinação mais avermelhada a amostra se situava, além disso, constatou-se a redução da capacidade de adsorção com a elevação desta temperatura durante a calcinação. Outros parâmetros que impactaram a adsorção foram o pH e a massa da amostra, pois quanto maior o pH da amostra maior a adsorção e com uma massa próxima de 1g, comparada a outra massa de 0,1g, pode-se obter uma variação de cerca de 13%, em razão do aumento de sítios ativos presentes na amostra. Dessa forma, para os dados obtidos o modelo que mais se adequou foi o de pseudo-segunda ordem. O adsorvente se mostrou favorável a adsorção de íons Pb^{2+} favorecida por sua estrutura lamelar.
Reis et al. (2018)	Caracterização tecnológica de uma zeólita exaurida, para a remoção de íons Mn^{2+} .	Caracterizar uma zeólita utilizada no craqueamento do petróleo e determinar os parâmetros de adsorção do manganês em soluções aquosas.	A zeólita faujasita apresentou grande potencial para ser empregada como adsorvente de íons e manganês, descrevendo o processo de adsorção por meio do modelo cinético de pseudo-primeira ordem, favorecido por baixas temperaturas e pH neutro. Ademais, a isoterma de Langmuir melhor se ajustou ao experimento, com uma relação de carregamento igual a 13,2 mg de manganês para cada grama de zeólita.
Figueiredo et al. (2018)	Cinética de adsorção de manganês em zeólitas exauridas.	Modelar a cinética de adsorção do íon Mn^{2+} em zeólitas e obter a energia de ativação para esse processo.	A zeólita exaurida se mostrou viável econômica e produtivamente para o uso no processo de remoção do íon de manganês, verificando-se um modelo que se ajusta a aos dados cinéticos e pseudo-segunda ordem e mostrando-se um processo extremamente rápido, levando apenas 3 horas para atingir o equilíbrio e uma energia de ativação de 55,4 kJ/mol.
Huanca, et al.(2018)	Caracterização e aplicação de uma zeólita natural de Ocuviri (Peru) para a remoção de Pb (II) em solução a nível laboratorial.	Caracterizar os aspectos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos da zeólita natural para dessa forma determinar a capacidade de adsorção e troca iônica para a remoção de chumbo.	Evidenciou-se a partir da caracterização mineralógica a presença abundante das zeólitas heulandita e mordenita, através da difração e fluorescência de raios X. Já a caracterização química exibiu uma relação de Si/Al igual a 6,16, ou seja, demonstrando a afinidade da amostra pelos cátions de chumbo. As taxas de remoções chegaram a 94,66% após 24 h de contato com a solução de chumbo, revelando a eficiência das zeólitas em remover os cátions de chumbo a nível laboratorial.
João et al. (2018)	Uso de zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão de Santa Catarina para a remoção de ferro, manganês e corante azul de metileno na água	Síntese de zeólita a partir de cinzas de carvão e emprego na adsorção de íons de Fe e Mn e do corante azul de metileno.	Os dados cinéticos do trabalho observam que o processo de sorção aumenta mais rapidamente durante o início do experimento, atingindo capacidade de remoção de 99% para o ferro e manganês e 90% para o corante nos 15 primeiros minutos, além disso, cineticamente a adsorção pela zeólita sintetizada pelo estudo obteve dados experimentais no qual o modelo de pseudo-segunda ordem se adequou melhor.
Kragovic et al. (2018)	Zeólita natural e modificada – Compostos de alginato. Aplicação para a remoção de cátions de metais pesados de soluções de águas contaminadas.	Investigar a remoção de cátions Pb^{2+} , proveniente de leitos de flutuação de minas de chumbo e zinco, por zeólitas naturais e zeólitas modificadas por cátions de Fe (III) encapsuladas por grânulos de alginato, além de estudar a influência de parâmetros como o pH e a concentração do metal no mecanismo da adsorção	O estudo verificou que o encapsulamento das zeólitas permitiu a redução da turbidez do efluente contribuindo para a adsorção, em especial para a zeólita natural, quase dobrando sua capacidade de adsorção. A isoterma de Freundlich melhor se ajustou a adsorção, não tendo grande impacto na taxa de remoção o pH inicial das soluções, porém, o experimento atingiu maior eficiência na faixa de pH igual ou inferior a 4,0 para ambas as zeólitas.
Núñez et al. (2018)	Alternativa para o tratamento de resíduos galvânicos com zeólitas naturais.	Estudo da utilização dos minerais zeolíticos como potencial solução para a contaminação por metais pesados e seus impactos gerados ao ambiente cubano.	O efluente no qual se realizou o experimento possuiu altos teores de cobre e ferro, assim, verificou-se a necessidade do contato por pelo menos 5 horas de contato com a zeólita para que haja a adsorção dos cátions. Para a capacidade máxima de adsorção o modelo que melhor se ajustou foi o de Langmuir, ademais, o a vazão do efluente e a granulometria foram parâmetros fundamentais. Dessa maneira, o uso das zeólitas se mostrou uma tecnologia limpa e viável economicamente.

Fanta et al. (2019)	Composto zeolítico dopado com cobre para a atividade antimicrobiana e remoção de metais pesados de águas residuais.	Demonstrar o efeito de remoção de metais pesados, atividade antibactericida e de controle de alguns parâmetros físicos no tratamento de águas residuais por zeólitas sintéticas modificadas e não modificadas pelo dopamento de cobre.	O estudo verificou que, após cerca de 90 minutos de experimento, houve a total remoção dos cátions em solução, além disso, a remoção tende a aumentar com o aumento da concentração inicial dos metais nas soluções aquosas. A adsorção para a zeólita não dopada foi de 100% para o chumbo, 99,37% para o cádmio e 92% para o cromo; já para a zeólita modificada, a remoção atinge 100% para o chumbo, 99,37% para o cádmio e 100% para o cromo. Ou seja, a principal modificação provocada pelo dopamento de cobre a remoção dos metais pesados foi a otimização da adsorção de cromo. Além disso, o experimento verificou considerável eficiência na redução da turbidez e aumento da condutividade da água tratada, redução das taxas de DBO e DQO e um leve aumento no pH, assim como a eliminação completa das bactérias em cerca de 50 minutos de experimento.
Silva, G. I. (2019)	Estudo do uso de Material Mineral contendo Zeólitas para o tratamento de efluentes (Chorume).	Estudo da capacidade de adsorção do material zeolítico para a remoção de compostos nitrogenados e metais pesados, visando o tratamento de efluentes de aterros sanitários.	A partir da caracterização da amostra através da difração de raios X, observou-se as espécies de zeólitas chabazitas e argilas expandidas em abundância, apresentando granulometria com diâmetro médio igual a 5 mm. Atuou-se com a faixa de pH de 7,44 e temperatura igual a 27,2°C. Dessa forma, observou-se que ao serem tratadas com saibro amigdalóide as zeólitas efetuaram a remoção total de amostras de águas ácidas de mina, contendo altos níveis de arsênico e chumbo, assim como, a remoção total de chumbo proveniente de soluções com concentração igual a 200ppm.
Farias et al. (2020)	Produção de matrizes adsorventes a partir de Zeólitas A e Sodalita.	Utilização do caulim de enchimento para a produção de material zeolítico, para utiliza-lo juntamente a argila na produção de pellets e no processo de adsorção.	O caulim amazônico utilizado para a produção da zeólita A e hidroxisodalita atingiu êxito, obtendo maior adsorção quando em pó quando comparado com os pellets produzidos, atingindo 80% de adsorção da concentração inicial de íons de cobre a 200 ppm. Além disso, verificou-se que a argila ofusca os cristais zeolíticos, exigindo a substituição por um material vegetal para aumentar a superfície de contato, no caso o carvão vegetal.
Isawi, H. (2020)	Usando pequenas esferas de nanocompósitos de zeólita/álcool polivinílico/alginate de sódio para a remoção de alguns metais pesados de águas residuais.	Analisar a possível viabilidade do composto sintetizado (Zeo/PVA/AS NC) para a remoção de íons de metais pesados como o manganês, cobre, chumbo, ferro, zinco, cádmio, níquel, lítio, estrôncio e alumínio de águas subterrâneas coletadas na Cidade do Ramadã (Egito).	Os resultados obtidos no trabalho apontam a máxima remoção dos cátions de chumbo, cádmio, estrôncio, cobre, zinco, níquel, manganês e lítio quando na faixa de pH igual a 6,0, obtendo taxas de adsorção máximas entre 92,4% a 99,5%. No entanto, os cátions de ferro e alumínio tiveram melhor comportamento quando na faixa de pH igual a 5. Além disso, ambos os íons levaram cerca de 2 horas para atingir o equilíbrio, a uma temperatura de 25°C, atingindo-se uma dose ideal de adsorvente de 20g por litro da solução. Termodinamicamente, verificou-se a adsorção química espontânea dos íons pela superfície do composto zeolítico, um processo endotérmico, no qual o modelo de Langmuir melhor se adaptou. Ademais, o composto apresentou diminuição significativa na capacidade de adsorção a partir da décima batelada.
Lobo-Recio et al. (2020)	Remoção altamente eficiente de íons de alumínio, ferro e manganês usando zeólita LTA obtida a partir de resíduos perigosos.	Investigar a capacidade de remoção de íons Al^{3+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} de soluções aquosas por zeólita LTA produzida a partir matéria prima não convencional e estudar o comportamento cinético e termodinâmico do processo de sorção.	O composto zeolítico produzido a partir dos resíduos perigosos de alumínio se mostrou muito eficaz na descontaminação de carvão, sendo um processo bem rápido para todos os íons experimentados. A preferência iônica no processo seguiu a seguinte ordem: $Al^{3+} > Mn^{2+} > Fe^{2+}$. Em comparação com os demais processos de adsorção do manganês, esse revelou uma grande eficiência, sendo impactado fortemente pela dosagem de zeólita para a remoção, atingindo valores superiores a 95% de remoção do cátion para uma dosagem de 7-10g de zeólita por litro de solução. Para o alumínio a faixa de pH ideal foi igual a 5,0 e para o ferro e o manganês uma faixa de 8,0 e 10,0, respectivamente. Para o manganês, o modelo de isoterma que melhor se ajustou foi o de Sips, no qual justifica uma adsorção física a baixas concentrações iniciais do metal e uma adsorção química a elevadas concentrações iniciais. O tempo de contato exigido para atingir o equilíbrio para o manganês foi de cerca de 30 minutos, no qual o modelo cinético que melhor se ajustou foi o de pseudo-primeira ordem.

Rignack-Delgado et al. (2020)	Redução de metais pesados no petróleo bruto leve cubano com o uso de zeólitas	Avaliar a aplicabilidade de compostos zeolíticos como adsorventes na remoção de metais pesados do petróleo bruto leve cubano.	A análise granulométrica verificou que a zeólita do depósito de San Andrés está majoritariamente entre 3,35 e 1 mm. Possuindo uma relação Si/Al igual a 5,43, apresentando grande estabilidade térmica e a soluções ácidas. Dessa forma, a zeólita mostrou grande afinidade pelos íons de chumbo e mercúrio presentes no óleo cru, além disso, notou-se a influência da granulometria na adsorção dos cátions de cromo.
Atsar et al. (2021)	Estudo termodinâmico e cinético: adsorção dos íons de Pb, Cr e Ni proveniente de Óleos de Lubrificação Gastos (SLO) usando argila modificada por ácido.	Investigar a cinética e o mecanismo de adsorção dos íons de chumbo, cromo e níquel por argila zeolítica modificada com ácido sulfúrico no tratamento de óleos lubrificantes.	Pode-se verificar que a temperatura foi um parâmetro importante para o processo de sorção, pois o aumento de temperatura resultou em um aumento da capacidade de adsorção da argila, ademais, observou-se que a remoção foi um processo naturalmente endotérmico e que diminui sua eficiência com a diminuição da massa de adsorvente utilizado. Dessa forma, o tempo mínimo de contato com o adsorvente foi de 4 horas para atingir o equilíbrio, havendo o aumento da taxa de remoção dos cátions quanto mais tempo a amostra esteve em contato com a argila, com cerca de 90% de remoção, até atingir a saturação e seguindo essa ordem de preferência iônica: $Pb^{2+} > Cr^{3+} > Ni^{2+}$. Além disso, o modelo cinético ao qual o experimento melhor se ajustou foi o de pseudo-segunda ordem e um processo de adsorção física espontâneo.
Henauth et al. (2021)	Utilização de zeólita comercial para tratamento de efluentes sintético e natural contaminados, visando remoção de íons Ag^+ e Mn^{2+} .	Determinar a capacidade da zeólita de remoção dos íons de prata e manganês por adsorção em duas diferentes temperaturas.	A zeólita natural se mostrou uma ótima alternativa para o tratamento de efluentes contendo os íons de prata e manganês, chegando a um total de 81% de remoção para os cátions de manganês a uma temperatura de 70°C. Além disso, a adsorção por meio de zeólitas mostraram-se mais viáveis para ensaios no qual houveram baixas concentrações de contaminantes.
Valdivia et al. (2021)	Síntese de zeólita Linde tipo F mediante tratamento alcalino com potassa cáustica proveniente Sillar, Peru: sua aplicação na adsorção de cobre (II).	Agregar valor ao mineral proveniente de Arequipa (Peru) através do tratamento alcalino para a formação de zeólitas, além disso, verificar sua viabilidade na remoção de metais como o cobre para a remediação ambiental.	A zeólita produzida a partir dos minerais vulcânicos peruanos demonstraram capacidade de troca iônica e adsorção, no qual o modelo cinético de Blanchard de pseudo-segunda ordem e a isoterma de Freundlich melhor se adequaram. Os materiais zeolíticos apresentaram granulometria de 4 mm, obtendo uma remoção de 29,40 mg por grama de zeólita sintetizada por um período de contato de 8 horas
Angaru et al. (2022)	Composto portátil Alginato de Sódio (AS) /Carboximetilcelulose (CMC) em esferas de zeólitas de cinzas volantes magnéticas bimetalicas (ZFN) para o tratamento de efluentes industriais contaminados por metais pesados via lote e coluna.	Examinar o emprego do composto AS/CMC – ZFN para a remoção de íons de Cr (VI) e Cu (II) através do estudo de parâmetros que interfiram na cinética e no mecanismo de adsorção, utilizando duas técnicas distintas: via lote (escala laboratorial) e via coluna contínua (escala que simula a condição do sistema hídrico real).	O composto AS/CMC – ZFN se mostrou um adsorvente ecologicamente e economicamente viável a remoção de íons de cromo e cobre, no qual a isoterma de Langmuir melhor se ajustou. A capacidade de adsorção do composto atingiu 10,15 mg de cobre por grama de zeólita e 63,29 mg de cromo por grama de zeólita seguindo um modelo cinético de pseudo-segunda ordem e mostrando grande eficiência comparado a zeólita natural comercial. Além disso, a adsorção utilizando o AS/CMC – ZFN se caracterizou entropicamente favorável, naturalmente espontânea e endotérmica. O uso da coluna contínua favoreceu o processo de adsorção, possuindo concordância com a literatura e possuindo validação estatística.
Ankrah et al. (2022)	Remoção de metais pesados de soluções aquosas usando derivados de cinzas volantes derivadas de zeólita NaP1.	Utilização de cinzas volantes derivadas de zeólita NaP1 para a remediação de cobre, zinco e chumbo da água, buscando uma possível solução para o efluente da planta de galvanoplastia.	No experimento, NaP1 mostrou grande rapidez cinética e eficiência de remoção para todos os metais experimentados, atingindo um percentual de remoção igual ou superior a 80% em apenas 15 minutos. O modelo cinético que mais se ajustou aos dados encontrados foi o de pseudo-segunda ordem e a isoterma foi o modelo de Langmuir. Além disso, a afinidade iônica demonstrada de acordo com a equação de Langmuir pela zeólita NaP1 foi nesta ordem: $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+}$.
Galindo & Huamán (2022)	Otimização do processo de remoção de Pb^{2+} e Zn^{2+} por meio de materiais adsorventes-Floculante Neonite™.	Otimizar o processo de adsorção de chumbo e zinco através da utilização do Neonite™, através de modelos matemáticos que prevejam as melhores condições para o aproveitamento de suas propriedades de adsorção e floculação.	A caracterização da Neonite™ por meio da difração de Raios X evidenciou a presença majoritária da zeólita clinoptilolita, na qual apresentou concentrações de SiO_2 igual a 44,50% e de Al_2O_3 igual a 11,70%, como evidenciado na fluorescência de Raio-x, obtendo uma relação Si/Al igual a 3,8. Assim, a remoção de chumbo atingiu um ápice de 99,87% para soluções de chumbo a concentração de 20ppm, atuando em uma faixa de pH entre 7 e 8, seguindo um modelo de pseudo-segunda ordem com adsorção média para os cátions de chumbo de 98,80%, utilizando o Neonite™

			<p>na concentração de 442,42mg/L. Ademais, verificou-se a preferência do material zeolítico pela a adsorção dos cátions de chumbo em relação ao zinco.</p>
Masoud et al. (2022)	<p>Ácido húmico e nano-zeólitas NaX como adsorventes de baixo custo e ecologicamente corretos para a remoção de Pb (II) e Cd (II) da água: caracterização, cinética, isotermas e estudo termodinâmico.</p>	<p>Desenvolver um eco-adsorvente natural e efetivo na adsorção de íons de chumbo e cádmio de matrizes aquáticas, utilizando nano-zeólitas NaX e ácido húmico como materiais.</p>	<p>A utilização dos compostos proporcionou uma versatilidade de sítios ativos para a remoção de íons metálicos, atuando em faixas de pH ácidas e neutras com considerável eficiência. O processo de remoção do cádmio variou de 36,36% a 99,40%, dependendo da amostra utilizada para o experimento, assim também ocorreu para o chumbo, tingindo entre 92,62% a 98,93%. As isotermas de Langmuir e Freundlich se ajustaram bem aos dados encontrados, a adsorção foi um procedimento exotérmico e o modelo cinético de pseudo-segunda ordem se ajusta melhor aos dados do procedimento. Assim, a adsorção dos íons de chumbo se mostrou espontânea e praticável para a nano-zeólita, porém, para os íons de cádmio ela se mostrou termodinamicamente não espontânea.</p>

Fonte: Autores (2022).

6. Discussão

Nos tópicos a seguir, discutir-se-á as informações relevantes encontradas nos artigos estudados. Os tópicos foram divididos de acordo com os metais previamente selecionados.

6.1 Chumbo

A partir da análise dos resultados das pesquisas apresentados na Tabela 3, sobre a remoção dos cátions de chumbo, verificou-se a espontaneidade termodinâmica do processo adsorptivo e a viabilidade do uso dos compostos zeolíticos para a sua remoção. Notou-se também a frequente ativação química do material zeolítico através da adição de compostos de alginato juntamente a álcool polivinílico, adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou ácido húmico, adição de flocculantes como o Neonite™ ou a partir do dopamento com íons de cobre, para favorecer a sorção do metal (Fanta et al., 2019; Isawi, 2020).

É importante salientar que mesmo sem a modificação do material adsorvente, a capacidade de remoção dos cátions foi elevada, atingindo valores superiores a 70% de adsorção como encontrados nas pesquisas de Rahimi & Mahmoudi (2017) e De-La-Veja et al. (2018). Além disso, as modificações realizadas buscaram majoritariamente o aumento da área superficial ou influência nos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente (Farias et al., 2020; Isawi, 2020).

Desse modo, a adsorção de íons de chumbo apresenta certa dependência com relação à faixa de pH na qual essas soluções se encontram, pois quanto menor a concentração do metal na solução, maior o pH ideal para o processo adsorptivo. Assim, o pH ideal encontrado para a remoção de Pb^{2+} na pesquisa realizada é em geral neutro ou ácido, atuando entre as faixas de pH inferiores a 7,0 (Barsi et al., 2017; Fidelis et al., 2018; Galindo & Huamán, 2022; Masoud et al., 2022).

Os artigos encontrados apresentaram em sua grande maioria dados experimentais que se adequaram melhor ao modelo de isoterma de Langmuir, a qual como já discorrido, descreve uma adsorção homogênea de sistemas sólido-líquido com a formação de uma monocamada de adsorvato na superfície do adsorvente. Todavia, também se verificou a existência de trabalhos como o de El-Maksod et al. (2017), Rahimi e Mahmoudi (2017), Kragovic et al. (2018) e Masoud et al. (2022) em que o modelo de Freundlich melhor se ajustou aos dados experimentais, o qual descreve uma adsorção de soluções aquosas com a formação de multicamadas sobre o adsorvente e heterogeneidade em sua superfície. Esses estudos diferenciam-se da maioria, em razão da utilização de soluções com baixas concentrações do metal, pois os modelos matemáticos de adsorção linear, tal como a isoterma de Langmuir, não se adequam da melhor forma a condição supracitada, diferentemente do modelo empírico de Freundlich, o qual mesmo a baixa concentrações não reduz sua equação à expressão de adsorção linear.

O estudo cinético do processo adsorptivo dos cátions de chumbo foi realizado nos artigos através da análise estatística de correlação entre vários modelos cinéticos, dessa maneira, observou-se que o modelo que melhor descreveu os dados experimentais foi o modelo de pseudo-segunda ordem, caracterizando uma adsorção química rápida e irreversível, a qual dois sítios ativos do adsorvente são ocupados e há transferência de elétrons entre os compostos e naturalmente espontâneo (Ankrah et al., 2022).

Além disso, verificou-se a saturação dos poros do adsorvente após uma certa quantidade de bateladas, como por exemplo o estudo realizado por Isawi (2020), o qual o resultado apresentou considerável redução da capacidade adsorptiva em função da saturação dos poros do adsorvente. Dessa forma, o uso de modelos de adsorção por meio de colunas contínuas auxilia na tentativa de aumentar a vida útil do adsorvente, assim como o tratamento regenerativo para processos termicamente estáveis, como realizado por De-La-Veja et al. (2018).

6.2 Cobre

Através da análise dos trabalhos, para a adsorção dos cátions de cobre, observou-se, assim como para o chumbo, a ativação do composto zeolítico adsorvente a partir da adição de substâncias químicas, tal como o tratamento alcalino realizado

por Valdivia et al. (2021) e o tratamento na morfologia do adsorvente, realizado por Isawi (2020), para o aumento de sua superfície de contato. O potencial hidrogeniônico e a temperatura do processo foram parâmetros limitantes para a remoção do metal, possuindo condições ideais de atuação entre a faixa de pH igual a 4,0 e 7,0 e sobre temperaturas de 25°C, 35°C e 65°C (Rudniak & Barsi, 2017). Além disso, os cátions de cobre atingiram uma capacidade adsorvativa entre 10,15 mg a 29,40 mg do íon para cada grama do composto zeolítico adsorvente (Barsi, 2017; Taamneh & Sharadqah, 2017; Valdivia et al., 2021).

O modelo de isoterma de Langmuir, demonstram uma melhor adequação aos dados experimentais obtidos na maioria dos artigos, caracterizando-se uma adsorção homogênea e, como já supracitado, a formação de uma monocamada de adsorvato (Zanin et al., 2017; Angaru et al., 2022). No entanto, os experimentos de Taamneh e Sharadqah (2017) e Valdivia et al. (2021) apresentaram que o modelo de Freundlich foi o que melhor se ajustou, para uma superfície heterogênea e a formação de mais de uma camada de adsorvato.

Cineticamente, a maioria dos trabalhos mostrou o modelo cinético de pseudo-segunda ordem, como o que obteve maior ajuste estatístico caracterizando um processo de quimissorção veloz e agradáveis para baixas concentrações (Ankrah et al., 2022). No entanto, Zanin et al. (2017) verificaram o modelo de pseudo-primeira ordem como sendo o que melhor se ajustou aos seus dados experimentais, o qual evidencia uma adsorção física com velocidade proporcional ao número de sítios livres.

6.3 Cromo

A observação dos resultados para os íons de cromo evidenciou um melhor desempenho dos compostos zeolíticos naturais LTA e o composto sintético AS/CMC-ZFN, obtendo uma capacidade de sorção de 41 mg e 63,29 mg de cromo para cada grama de zeólita utilizada, respectivamente, com a influência do processo de saturação de seus poros (Arroyave-Manco et al., 2017; Angaru et al., 2022). Outro fato é o de que o tempo de contato médio para a remoção do metal é de cerca de 1 a 4 horas, podendo variar de acordo com a concentração inicial dos cátions e a granulometria do adsorvente (Fanta et al., 2019; Reñack-Delgado et al., 2020).

Outrossim, o estudo termodinâmico desse processo adsorvativo mostrou o modelo de isoterma de Langmuir o que mais se ajustou, ao qual, para concentrações de cromo igual a 200 ppm e 500 ppm foi possível atingir taxas de remoção iguais ou superiores a 92% (Rudniak & Barsi, 2017; Fanta et al., 2019). O processo adsorvativo se mostrou entropicamente favorável e altamente endotérmica, além de um processo ecologicamente viável (Angaru et al., 2022). Já para o estudo cinético, os dados encontrados mostraram o modelo de pseudo-segunda ordem como o de melhor ajuste, caracterizando uma reação espontânea e como adsorção química, a qual possibilita a troca de elétrons durante o procedimento.

6.4 Manganês

Os experimentos apresentaram grande dependência à concentração inicial dos metais nas soluções aquosas e o tempo de contato com o adsorvente, com taxas de remoções maiores no início do experimento e sendo um processo extremamente endotérmico (Figueiredo et al., 2018; João et al., 2018). A remoção de manganês atingiu resultados superiores a 90% e atua em uma faixa de pH levemente básica.

Para o cátion do manganês bivalente o estudo termodinâmico, modelo de isoterma de Langmuir apresentou ajuste majoritário, como visto nos trabalhos de Reis et al. (2018) e Isawi (2020), porém, Lobo-Recio et al. (2020) constataram o modelo de isoterma de Sips como o melhor aos dados empíricos, no qual associa a heterogeneidade da superfície do adsorvente à formação de uma camada única de adsorvato na superfície do adsorvente, permitindo a conversão em isoterma de Langmuir quando submetido a elevadas concentrações do metal e em Freundlich a baixas concentrações.

Para o estudo cinético, a adsorção dos cátions de manganês nos trabalhos de Figueiredo et al. (2018) e Lobo-Recio et al. (2020) se mostrou que o modelo cinético de pseudo-primeira ordem foi o melhor ajustado, no qual o número de sítios livres

rege a velocidade do processo de fisiossorção, levando um tempo de equilíbrio de cerca de apenas 30 minutos. Contudo, João et al. (2018) obtiveram o modelo de pseudo-segunda ordem, como o melhor, caracterizando uma rápida adsorção química dos cátions em questão.

7. Considerações Finais

Neste trabalho de revisão de literatura observou-se a utilização de compostos zeolíticos como materiais adsorventes empregados na remoção de chumbo, cobre, cromo e manganês em soluções aquosas atingindo taxas de adsorção superiores a 90% para os metais estudados, demonstrando preferência iônica de acordo com a seguinte ordem: $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cr^{3+} > Mn^{2+}$.

Além disso, notou-se a busca constante pela otimização desse processo adsorvente através do preparo prévio da zeólita, permitindo assim, o aumento dos poros do adsorvente e, conseqüentemente, aumentando a eficiência adsorvente. Ademais, parâmetros como a concentração inicial do metal nas soluções aquosas, a faixa de pH e a temperatura do processo impactaram de forma relevante à adsorção, sendo fundamentais para o controle do tempo e da eficiência adsorvente.

A utilização de resíduos e subprodutos para a síntese do composto zeolítico também foi bastante evidenciada, proporcionando o reaproveitamento de resíduos, antes despejados no ambiente, que em elevada quantidade geram grande poluição ambiental.

Dessa forma, como sugestão para a realização de trabalhos futuros é de grande interesse o estudo da utilização de zeólitas como adsorvente para o abrandamento de águas industriais, com o objetivo de remediar o impacto causado pelos cátions de cálcio e magnésio aos equipamentos industriais. Além de englobar o estudo de dessorção desses íons para garantir a reutilização do material adsorvente, podendo servir como substituto mais barato para os trocadores iônicos utilizados a nível industrial.

Referências

- Al-Essa, K. & Khalili, F. (2018). Heavy Metals Adsorption from Aqueous Solutions onto Unmodified and Modified Jordanian Kaolinite Clay: Batch and Column Techniques. *American Journal of Applied Chemistry*, 6 (1), 25-34. [10.11648/j.ajac.20180601.14](https://doi.org/10.11648/j.ajac.20180601.14).
- Alexander, J. A., Surajudeen, A., Aliyu, E. U., Omeiza, A. U., & Zaini, M. A. (2017). Multi-metals column adsorption of lead(II), cadmium(II) and manganese(II) onto natural bentonite clay. *Water Science & Technology*. [10.2166/wst.2017.391](https://doi.org/10.2166/wst.2017.391).
- Andreazza, R., Camargo, F. A., Antonioli, Z. I., Quadro, M. S., & Barcelos, A. A. (2013). Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. *Revista de Ciências Agrárias*, 36 (2), 127-136.
- Angaru, G. K. R., Choi, Y., Lingamdinne, L. P., Koduru, J. R., Yang, J., Chang, Y., & Karri, R. R. (2022). Portable SA/CMC entrapped bimetallic magnetic fly ash zeolite spheres for heavy metals contaminated industrial effluents treatment via batch and column studies. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07274-5>.
- Ankrah, A. F., Tokay, B., & Snape, C. E. (2022). Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions Using Fly-Ash Derived Zeolite NaP1. *Int J Environ Res*.
- Araujo, A. L., Silva, M. C., Gimenes, M. L., & Barros, M. A. (2009). Estudo Termodinâmico da Adsorção de Zinco em Argila Bentonita Bofe Calcificada. *Scientia Plena*, 5 (12).
- Arroyave-Manco, J. C., Arboleda, J. C., Hoyos-Ayala, D. A., & Echavarría-Isaza, A. P. (2017). LTA and FAU zeolites from coal combustion and residue by-products for Chromium removal application. *DYNA*, 85 (204), 150-160. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67096>.
- Atsar, F.S., Kukwa, D.T., Wuana, R.A. & Arwenyo, B. (2021). Kinetics and Thermodynamic Studies: Adsorption of Pb, Cr and Ni Ions from Spent Lubrication Oil (SLO) Using Acid Modified Clay. *American Journal of Analytical Chemistry*, 12, 109-120. <https://doi.org/10.4236/ajac.2021.125009>.
- Bai, R. S. & Abraham, T. E. (2003). Estudos sobre a adsorção-dessorção de cromo (VI) usando biomassa fúngica imobilizada. *Bioresource Technology*, 87 (1), 17-26. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00222-5).
- Barsi, F. V. (2017). Remoção de cátions metálicos utilizando zeólita HUSY. *IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade*.
- Borba, C. E., Módenes, A. N., Espinoza-Quiñones, F. R., Borba, F. H., Bassi, A. F., & Ribeiro, C. (2012). Estudo da cinética e do equilíbrio de adsorção dos corantes azul turquesa QG e amarelo reativo 3R em carvão ativado. *ENGEVISTA*, 14 (2), 135-142.
- Braga, A. A. C. & Morgon, N. H. (2007). Descrições estruturais cristalinas de zeólitos. *Química Nova*, 30 (1), 178-188.

- Brizola, J. & Fantin, N. (2016). Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. *Revista de Educação do Vale do Arinos*, 3 (2), 23-29.
- Cardoso, C.K.M., Santana, R.S.G., Silva, V.L., Meirelles, A.C.L.E., Mattedi, S., Moreira, I.T.A., & Lobato, A.K.C.L. (2020). Kinect and equilibrium study of petroleum adsorption using pre-treated coconut fibers. *Research, Society and Development*, 9(7), 1-31.
- Chen, H. & Wang, A. (2007). Kinetic and isothermal studies of lead ion adsorption onto palygorskite clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, 307, 309-316. doi:10.1016/j.jcis.2006.10.054.
- Conceição, D., Jacques, R., Bento, F., Simonetti, A., Selbach, P., & Camargo, F. (2007). Redução de cromo hexavalente por bactérias isoladas de solos contaminados com cromo. *Ciência Rural*, 37 (6), 1661-1667.
- De-La-Veja, D. P., González, C., Escalante, C. A., Gallego, J., Salamanca, M., & Manrique-Losada, L. (2018). Uso de zeólita faujasita para adsorción de iones em aguas residuales municipales. *Tecnología y Ciencias del agua*. DOI:10.24850/j-tyca-2018-04-08.
- El Maksod, I. H., Kosa, S., & Hegazy, E. Z. (2017). The Effect of Preparation Conditions on the Removal Efficiency of Water Pollutants Using LTA Zeolite. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 811-821. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.97054>.
- Fanta, F. T., Dubale, A. A., Bebizuh, D. F., & Atlabachew, M. (2019). Copper doped zeolite composite for antimicrobial activity and heavy metal removal from waste water. *BMC Chemistry*. <https://doi.org/10.1186/s13065-019-0563-1>.
- Farias, B. M., Rodrigues, E. C., Rocha Junior, C. A. F., Pinheiro, A. P., Macêdo, E. N., & Souza, J. A. S. (2020). Produção de matrizes adsorventes a partir de Zeólita A e Sodalita. *Brazilian Journal of Development*, 6 (9), 73464-73478. DOI:10.34117/bjdv6n9-706.
- Fidelis, M. Z., Fávoro, Y. B., de Geus, R. A., França, M. F. C., & Lenzi, G. G. (2018). Aplicação de Bentonita no processo de adsorção para a remoção de chumbo. *XIV Simpósio Italo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - SIBESA*.
- Figueiredo, R. S., Leao, S. S., & Leão, V. A. (2018). Cinética de adsorção de manganês em zeólitas exauridas. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 15 (1), 8-14. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1186>.
- Fungaro, D. A. & Borrelly, S. I. (2012). Síntese e caracterização de zeólita de cinzas de carvão modificada por surfactante catiônico. *Cerâmica*, 58, 77-83.
- Galindo, E. C. V. & Huamán, A. S. (2022). Optimización del proceso de remoción de Pb²⁺ y Zn²⁺ por el material adsorbente-floculante Neonite^{MR}. *Rev Soc Quím Perú*, 87 (4). DOI 10.37761/rsqp.v87i4.362.
- Galvão, M. C. & Ricarte, I. L. (2020). Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *LOGEION: Filosofia da informação*, 6 (1), 57-73. <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>.
- Gomes, M. R., Rogero, M. M., & Tirapegui, J. (2005). Considerações sobre cromo, insulina e exercício físico. *Rev Bras Med Esporte*, 11 (5).
- Guerra, D. L., Lemos, V. P., Angélica, R. S., & Airoidi, C. (2007). Influência de argilas pilarizadas na decomposição catalítica do óleo de andiroba. *Eclética Química*, 32 (4), 19-26.
- Henauth, P. H., Silva, A. D., & Soares, I. B. (2021). Utilização de zeólita comercial para tratamento de efluentes sintético e natural contaminados, visando a remoção de íons de Ag⁺ e Mn²⁺. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, 5 (1). 10.33947/2595-6264-V5N1-4742.
- Hildebrando, E. A., Angélica, R. S., Neves, R. F., & Valenzuela-Díaz, F. R. (2012). Síntese de zeólita do tipo faujasita a partir de um rejeito de caulim. *Cerâmica*, 58, 453-458.
- Huanca, P. K., Paredes, B., Rodríguez, M., Gonzales, D. P., Tejada, T. R., & Chávez, J. E. (2018). Caracterización y aplicación de una zeólita natural de Ocuiviri (Peru) para la remoción de Pb (II) em solución a nível laboratório. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9 (3), 1-12.
- Isawi, H. (2020). Using Zeolite/Polyvinyl alcohol/sodium alginate nanocomposite beads for removal of some heavy metals from wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 5691-5716. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.04.009>.
- João, J. J., Júnior W. S., & Vieira, J. L. (2018). Use of zeolite synthesized from coal ash from Santa Catarina for removal of iron, manganese and methylene blue dye in water. *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. doi:10.4136/ambi-agua.2224.
- Kragovic, M., Pasalic, S., Markovic, M., Petrovic, M., Nedeljkovic, B., Momcilovic, M., & Stojmenovic, M. (2018). Natural and Modified Zeolite—Alginate Composites. Application for Removal of Heavy Metal Cations from Contaminated Water Solutions. *Minerals*, 8 (11). doi:10.3390/min8010011.
- Lima, M. G. P., Silva, K. V. L. G., Santos, R. L., Martins, A. K. L., Bem, M. S. F., Leonel, A. C. G., Lima, A. K. A., Costa, C. A., Gondim, E. T., & Solza, L. C. D. (2022). Tecnologias para o cuidado em saúde mental e enfermagem: Revisão integrativa. *Research, Society and Development*, 11 (15). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37648>.
- Lima, V. F. & Merçon, F. (2011). Metais pesados no ensino de química. *Química Nova na Escola*, 33 (4).
- Lobo-Recio, M.Á., Rodrigues, C., Jeremias, T.C., Lapolli, F.R., Padilla, I., & López-Delgado, A. (2020). Highly efficient removal of aluminum, iron, and manganese ions using Linde type-a zeolite obtained from hazardous waste. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128919>.
- Lucena, G. L., Silva, A. G., Honório, L. M. C., Santos, V. D. (2012). Cinética de adsorção de cobre (II) utilizando bioadsorventes. *Scientia Plena*, 8 (9).
- Masoud, M. S., Zidan, A. A., El Zokm, G. M., Elsamra, R. M. I., & Okbah, M. A. (2022). Humic acid and nano-zeolite NaX as low cost and eco-friendly adsorbents for removal of Pb (II) and Cd (II) from water: characterization, kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02608-9>.
- Moreira, F. R. & Moreira, J. C. (2004). Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. *Rev Panam Salud Publica*. 15 (2), 119-129.

- Novo, B. L., Bertolino, L. C., & Simões, K. M. (2017). Estudo termodinâmico de adsorção e dessorção de chumbo e cádmio em efluentes sintéticos utilizando a palygorskita como adsorvente. *XXV Jornada de Iniciação Científica e I Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação*.
- Núñez, H. H., Martínez, Y. Z., Olmo, J. P., & Olmo, E. A. (2018). Alternativa para el tratamiento de residuales galvánicos con zeólita naturales. *INFOMIN*, 10 (1), 4-16.
- Oliveira, A. B., Williams, C., & Nascimento, A. (2006). Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. *R. Bras Ci Solo*, 30, 99-110.
- Paz, J. E. M., Garnica, A. I. C., & Curbelo, F. D. S. (2018). Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana-de-açúcar ativado. *HOLOS*. 10.15628/holos.2018.7544.
- Penha, F. G., Spier, V. C., & Debacher, N. A. (2001). Adsorção de xantatos sobre pirita. *Quim. Nova*, 24 (5), 612-615.
- Pergher, S. B. C., Caovilla, M., & Detoni, C. (2005). Remoção de Cu^{2+} de soluções aquosas em zeólitas NaX. Efeito da granulometria. *Quim. Nova*, 28 (3), 397-401.
- Piquet, A. B. & Martelli, M. C. (2022). Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11 (3). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26506>.
- Plotegher, F. & Ribeiro, C. (2009). Síntese e caracterização da zeólita ZSM-5 para uso em sistemas de adsorção química. *Comunicado Técnico 107 – EMBRAPA*, São Carlos, SP.
- Rahimi, M & Mahmoudi, J. (2017). Studies on optimization of efficient parameters for removal of lead from aqueous solutions by natural zeolite as a low-cost adsorbent using response surface methodology. *Advances in Environmental Technology*, 2, 99-108.
- Reis, F. D., Leão, V. A., & Cunha, E. C. (2018). Caracterização tecnológica de uma zeólita exaurida, para remoção de íons Mn^{2+} . *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 15 (2), 122-128. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1185>.
- Rignack-Delgado, M., Sánchez-Rodríguez, A. M., Reyes-Dalmau, A., & Arias-Gilart, R. (2020). Reducción de metales pesados en el crudo ligero cubano con el uso de zeólita. *RTQ*, 40 (3).
- Rigo, R. T., Pergher, S. B., Petkowicz, D. I., & Santos, J. H. (2009). Um novo procedimento de síntese da zeólita a empregando argilas naturais. *Quím. Nova*, 32 (1), 21-25.
- Rocha, R. A. & Afonso, J. C. (2012). Manganês. *Química Nova na Escola*, 34 (2), 103-105.
- Rudniak, A. & Barsi, F. V. (2017). Estudo do processo de adsorção na remoção de cátions metálicos utilizando zeólita HBEA. *IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade*.
- Sampaio, J. A., Andrade, M. C., Dutra, A. J., & Penna, M. T. (2008). Manganês. *Rochas e Minerais Industriais – CETEM 2º edição*.
- Sargentelli, V., Mauro, A. E., & Massabni, A. C. (1996). Aspectos do metabolismo do cobre no homem. *Quím. Nova*, 19 (3).
- Schifer, T. S., Junior, S. B., & Montano, M. A. E. (2005). Aspectos toxicológicos do chumbo. *Infarma*, 17 (5).
- Schmitz, A. P., Vieira, M., Antonioli, C. A., Silveira, W., Prado, J. P., Beltran, L. B., & Cusioli, L. F. Bergamasco, R. (2021). Estudo da cinética de adsorção do carvão ativado impregnado com óxido de grafeno. *Brazilian Journal of Development*, 7 (1), 10732-10743. DOI:10.34117/bjdv7n1-734.
- Silva, G. I. (2019). Estudo do uso de Material Mineral contendo Zeolitas para o tratamento de efluentes (Chorume). *SEFIC2019*.
- Silva, J. E., Rodrigues, F. I., Pacífico, S. N., Santiago, L. F., Muniz, C. R., Saraiva, G. D., Nascimento, R. F., & Sousa Neto, V. O. (2018). Estudo de Cinética e Equilíbrio de Adsorção Empregando a Casca do Coco Modificada Quimicamente para a Remoção de Pb(II) de Banho Sintético. *Revista Virtual de Química*, 10 (5), 1248-1262. 10.21577/1984-6835.20180086.
- Silva, W. L. & Simoni, J. A. (2018). Estudo termodinâmico da adsorção de cobre (II) em montmorilonita organicamente modificada. *Cerâmica*, 64, 403-412. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712395>.
- Souza, A. K., Morassuti, C. Y., & Deus, W. B. (2018). Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. *Acta Biomedica Brasiliensis*, 9 (3). <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.189>.
- Souza, D. R., Benedito, E. M. M., Sales, J. V. P., Silva, L. Z., Silva, N. S., Yamato, M. A. C., Colombo, S. M., Pedro, A. C., & Cardoso, M. A. P. (2021). Avaliação do Potencial de Adsorção de Cromo (VI) através da semente da Moringa oleifera. *Research, Society and Development*, 10 (2). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12591>.
- Souza, L. C., Borges, K. S. C., Campos, M. L., Miquelluti, D. J., da Silveira, C. B., Rita, V. A., & Pereira, J. P. (2017). Efeito do pH na capacidade máxima de remoção de cobre por zeólita natural. *RevistaMateria*, 22 (2). 10.1590/S1517-707620170002.0139.
- Taamneh, Y. & Sharadqah, S. (2017). The removal of heavy metals from aqueous solution using natural Jordanian zeolite. *Appl Water Sci*, 7. DOI 10.1007/s13201-016-0382-7.
- Valdivia, M. R., Velásquez, G. O., Soncco, K. C., & Paredes, V. B. (2021). Síntesis de zeólita Linde F mediante tratamento alcalino com potassa cáustica a partir de roca de origen volcánico proveniente de Sillar, Peru; su aplicación en la asorción de cobre (II). *Revista Boliviana de Química*, 38 (1), 14-25.
- Zanin, E., Scapinello, J., Oliveira, M., Rambo, C. L., Franscescon, F., Freitas, L., Mello, J. M. M., Fiori, M. A., Oliveira, J. V., & Dal Magro, J. (2017). Adsorption of heavy metals from wastewater graphic industry using clinoptilolitezeolite as adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.008>.
- Zeferino, L. F. & Freitas, P. A. (2013). Estudo cinético da adsorção do corante índigo blue (2,2 – Bis - 2,3 – Diidro – 3 – oxoindolilideno) em fibras de casca de coco verde (*cocos nuciferal*).